

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

КОЗИР ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 536.532, 681.5.015

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ
КОРОТКИХ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ**

Спеціальність 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне
забезпечення

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Туз Юліан Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Захаров Ігор Петрович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, МОН України, завідувач кафедри
метрології та технічної експертизи;

доктор технічних наук
Ковтун Світлана Іванівна,
Інституту технічної теплофізики НАН України,
старший науковий співробітник відділу моніторингу
та оптимізації теплофізичних процесів.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р., о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. №22, ауд. №701.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр.Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «29» березня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради

А. І. Замулко

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми. Вимірювання температури газових продуктів горіння на виході камер згорання двигунів літаків та ракет, розжарених газових потоків, які виникають при вибухах (наприклад, при випробуваннях систем від'єднання літальних апаратів та ін.), виявляється надзвичайно складним завданням для практичної реалізації, в умовах надзвичайно високих тисків і реактивних середовищ, із заданим ступенем точності. Умови даних вимірювань накладають жорсткі обмеження на параметри системи вимірювання температури, такі як: первинні перетворювачі повинні вимірювати високі значення температури (до 2500 °С), витримувати значний тиск та вплив агресивного середовища та не руйнуватись.

Істотний внесок в розвиток теорії вимірювання температури зробили вчені Г. Рибо, А. Е. Кадышев, Н. А. Яришев, О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, Б. И. Стадник, Р. J. Dyne, X. M. Хашеміан. та ін..

В останні десятиліття широкого розповсюдження набули безконтактні методи вимірювання температури. Серед них варто виділити оптичні методи вимірювання температури. Перевагами оптичних методів є відсутність впливу перетворювача на температурне поле в середовищі, можливість визначення просторового розподілу температури. Проте, перераховані переваги оптичних методів не дозволили їм витіснити контактні засоби вимірювання температури. Перш за все, це пов'язано із значними методичними похибками при застосуванні оптичних методів. Носієм інформації про температуру середовища є електромагнітне випромінювання. Математичні залежності температури від інтенсивності і спектру електромагнітного випромінювання розроблені для математичної абстракції – абсолютно чорного тіла. В реальних вимірюваннях ці залежності мають обмежене застосування, при вимірюванні температури коротких теплових імпульсів, оскільки спектральна щільність розподілу електромагнітного випромінювання, яку можна використати для визначення температури, залежить від хімічного складу об'єкту вимірювання, його фізичного стану, стану поверхні (границі розділу об'єкта і навколишнього середовища).

Головним недоліком контактних методів вимірювання із використанням термопар є їх теплова інерційність, що не дозволяє проводити вимірювання температури швидкоплинних процесів. Використання термопар для вимірювання температури газових потоків при вибухах, передбачає застосування екранованих термопар, або відкритих термопар із товстих термоелектродів, що збільшує теплову інерцію і тим самим збільшує динамічну похибку вимірювання температури.

Звідси випливає необхідність дослідження динамічних характеристик термопар і розробки методики відновлення значення температури за значенням термо-ЕРС термопари в перехідному режимі її роботи, при відносно невисоких значеннях температури чутливого елементу термопари.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувались на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного

університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Тематика дисертаційної роботи пов'язана із науковою темою «Дослідження та розробка експериментальних зразків систем телеметричних вимірювань мініатюрних літальних засобів» в рамках договору №27/01-НП від 06.03.2015 року.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів за рахунок розробки методик ідентифікації динамічних характеристик термопар та використання динамічних характеристик для відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за виміряними значеннями термо-ЕРС термопари.

Для реалізації цієї мети поставлено та вирішено такі основні завдання:

1. Аналіз існуючих методів та засобів вимірювання температури із метою обґрунтування необхідності вирішення науково-практичної задачі, яка розглядається у роботі.

2. Теоретичний аналіз та дослідження динамічних характеристик термопар та розробка методів ідентифікації динамічних характеристик термопар для різних умов застосування.

3. Розвиток методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі їх перехідної характеристики шляхом зовнішнього розігріву спаю термопари лазерним променем, який створює квазіступінчатий сигнал температури.

4. Удосконалення методу ідентифікації динамічних характеристик термопар шляхом внутрішнього розігріву спаю термопари струмом гармонічної форми, який би дозволив отримати повну перехідну характеристику термопари.

5. Розробка методу ідентифікації динамічних характеристик термопар, який заснований на визначенні сталих часу термопари шляхом аналізу амплітудо-фазочастотної характеристики термопари за рахунок внутрішнього розігріву спаю термопари гармонічним струмом.

6. Розробка методу вимірювання температури коротких теплових імпульсів за рахунок відновлення форми температури короткого теплового імпульсу за виміряними значеннями термо-ЕРС термопари, шляхом використання апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених завдань виконано із використанням методів системного аналізу, математичного моделювання та експериментальних досліджень, теорії ймовірності і випадкових процесів, математичної статистики і теорії похибок вимірювань, чисельних методів розв'язання інтегральних рівнянь та обернених задач, глобального випадкового пошуку екстремуму.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на визначенні сталих часу термопар шляхом аналізу їх амплітудо-фазочастотних характеристик по другій гармоніці, яку отримують внутрішнім розігрівом спаю термопари гармонічним струмом. У результаті цього, розігрів спаю термопари, на відміну від існуючих методів, проводиться стаціонарним процесом.

2. Розроблено новий метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів, який відрізняється можливістю відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за виміряними значеннями термо-ЕРС термопари, за рахунок включення у зворотній зв'язок операційного підсилювача апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари.

3. Розроблено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на внутрішньому розігріві спаю термопари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка, який, на відміну від існуючих методів внутрішнього розігріву спаю термопари, дозволяє отримати повну перехідну характеристику.

4. Удосконалено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури, який, на відміну від існуючих методів, дозволяє отримати режим установлення сигналу термо-ЕРС на виході термопари.

Практичне значення отриманих результатів

1. Практичне значення отриманих результатів полягає у втіленні розроблених методів ідентифікації динамічних характеристик термопар у реальних вимірювальних системах. У зв'язку з чим, рекомендовано вказувати у технічній документації до термопар крім статичної характеристики, ще й динамічну характеристику.

2. Розроблений метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, шляхом визначення сталих часу термопар на основі аналізу їх амплітудо-фазочастотних характеристик по другій гармоніці, які отримують внутрішнім розігрівом спаю термопар гармонічним струмом, дозволяє отримати відносну стандартну невизначеність найменшої сталої часу, яка не перевищує 3%. Застосування цього методу дозволяє зменшити похибку визначення сталої часу, за одноланковою моделлю, на 8%.

3. Розроблений метод вимірювання температури коротких теплових імпульсів був апаратно реалізований при розробці інформаційно-вимірювальної системи збору та аналізу параметрів польоту відокремлюваного у повітрі елемента. Даний метод використовувався для вимірювання температури вибуху піропатрону, системи від'єднання елемента від ракетносія, що дозволило покращити траєкторію польоту відокремлюваного елемента.

4. Розроблений метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів забезпечує відносну стандартну невизначеність вимірювання температури короткого теплового імпульсу, яка не перевищує 5%.

5. Результати дисертаційного дослідження впроваджені: у науково-дослідному інституті автоматизації експериментальних досліджень, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Роботи [7-9] виконані без співавторів. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються даного дослідження, автору належать: дослідження методів автоматизації аналізу моделей термоперетворювачів [1]; дослідження прецизійних підсилювачів [2]; аналіз та класифікація методів вимірювання температури [3]; розробка планів експериментів на основі ЛПТау рівномірно розподілених послідовностей для пошуку оптимальних значень параметрів моделей та їх статистичне дослідження [4-5]; розробка методу та системи ідентифікації динамічних характеристик на основі використання радіоімпульсу струму [6, 13-14]; дослідження динамічних моделей термопар [10]; розробка та дослідження методу ідентифікації динамічних характеристик термопар із використанням лазерного променя [15-16]; розробка та дослідження методу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ [17].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дослідження доповідалися та обговорювалися на: Наук.-техн. конф. викладачів, науковців, аспірантів та студентів присвячена Дню Науки (Київ, 2014); XXI науково-технічної конференції студентів та молодих «ПІРОТЕХНОЛОГІЇ, НАВІГАЦІЯ, КЕРУВАННЯ РУХОМ ТА КОНСТРУЮВАННЯ АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ», (Київ, 2018); X Міжнар. наук. тех.. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка», (Харків, 2016); XI Міжнар. наук.-тех. конф. «Піротехнології, навігація, керування рухом керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки» (секція Інформаційні технології) (Київ, 2017); VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології «Technical Using of Measurement-2020» (Львів, 2020); XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРИЯ) (Харків, 2020).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, у тому числі 1 монографія, 9 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у фахових виданнях України категорії «А», Scopus) 4 патенти на корисні моделі, 1 тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 54 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 157 сторінок основного тексту, 71 рисунок та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукових досліджень, наведено дані про зв'язок роботи із науковими

програмами, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У **першому розділі** виконано огляд методів та засобів вимірювання температури та проведено їх класифікацію. Проведено аналіз переваг та недоліків цих методів. Зважаючи на виявлені недоліки безконтактних методів вимірювання температури коротких теплових імпульсів при випробуванні фізичних моделей відокремлюваних елементів, вибір вимірювального перетворювача температури впав на контактні методи. Дані методи мають широку історію застосування та достатньо розроблені методики вимірювання температури у статиці.

На основі проведеного аналізу контактних засобів вимірювання в якості термоперетворювача була вибрана термопара. Важливою проблемою вимірювання нестаціонарної температури термопарою є динамічна похибка вимірювання. Її зменшення потребує врахування динамічних характеристик термопар. Дані характеристики не вказуються виробниками у технічній документації до термопар. Більш того, не розвинуті методики ідентифікації динамічних характеристик термопар.

Враховуючи вищезазначене, сформульовано мету, об'єкт та предмет дослідження, встановлено можливі шляхи досягнення поставленої мети, що окреслюють структуру та зміст наступних розділів роботи.

У **другому розділі** виконано теоретичний аналіз та дослідження властивостей динамічних характеристик термопар. Сформовані основні теоретичні принципи нових методик ідентифікації динамічних характеристик термопар. Отримано детерміновані моделі похибок вимірювання перехідної та амплітудо-фазочастотної характеристик.

Для відновлення значення температури на основі аналізу термо-ЕРС потрібно знати динамічні характеристики термопар. Серед повних динамічних характеристик найбільш придатними із точки зору практичної реалізації є перехідна та амплітудо-фазочастотна характеристики (АФЧХ), які можуть бути взаємно перераховані.

Рівняння перехідної характеристики термопар у операторній формі має тільки дійсні корені, тому можна його записати у вигляді:

$$H(s) = \frac{1}{s(\tau_n s + 1)(\tau_{n-1} s + 1) \cdots (\tau_1 s + 1)}.$$

Виконавши заміни змінних $a = \frac{1}{\tau_1}$, $b = \frac{1}{\tau_2}$ отримано рівняння перехідної характеристики в операторній формі:

$$H(s) = \frac{abc \cdots}{s(s+a)(s+b)(s+c) \cdots}.$$

Використовуючи метод аналітичних розрахунків були отримані оригінали та образи перехідних характеристик для моделей із кількістю сталих часу від двох до шести (табл. 1).

Таблиця 1. Моделі перехідної характеристики термопар

$\mathcal{L}_s^{(-1)}$ (часова форма)	\mathcal{L}_s (операторна форма)
---------------------------------------	------------------------------------

$h(t) = 1 - e^{-at}$	$H(s) = \frac{a}{s(s+a)}$
$h(t) = 1 + \frac{be^{-at}}{a-b} + \frac{ae^{-bt}}{b-a}$	$H(s) = \frac{ab}{s(s+a)(s+b)}$
$h(t) = 1 - \frac{bce^{-at}}{(a-b)(a-c)} - \frac{ace^{-bt}}{(b-a)(b-c)} - \frac{abe^{-ct}}{(c-a)(c-b)}$	$H(s) = \frac{abc}{s(s+a)(s+b)(s+c)}$
$h(t) = 1 + \frac{bcde^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)} + \frac{acde^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)} + \frac{abde^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)} + \frac{abce^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)}$	$H(s) = \frac{abcd}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)}$
$h(t) = 1 - \frac{bcdfe^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)(a-f)} - \frac{acdf e^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)(b-f)} - \frac{abdfe^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)(c-f)} - \frac{abcfe^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)(d-f)} - \frac{abcde^{-ft}}{(f-a)(f-b)(f-c)(f-d)}$	$H(s) = \frac{abcdf}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)(s+f)}$
$h(t) = 1 + \frac{bcd f g e^{-at}}{(a-b)(a-c)(a-d)(a-f)(a-g)} + \frac{acdf g e^{-bt}}{(b-a)(b-c)(b-d)(b-f)(b-g)} + \frac{abdf g e^{-ct}}{(c-a)(c-b)(c-d)(c-f)(c-g)} + \frac{abcf g e^{-dt}}{(d-a)(d-b)(d-c)(d-f)(d-g)} + \frac{abcd g e^{-ft}}{(f-a)(f-b)(f-c)(f-d)(f-g)} + \frac{abcd f e^{-gt}}{(g-a)(g-b)(g-c)(g-d)(g-f)}$	$H(s) = \frac{abcd f g}{s(s+a)(s+b)(s+c)(s+d)(s+f)(s+g)}$

Рівняння із табл. 1 зручно напряму використовувати в операціях апроксимації перехідної характеристики термопари, оскільки в більшості довідників оригінали та образи представлені тільки для рівнянь першого та другого ступеня.

В дисертації запропоновано новий метод ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі їх амплітудо-фазочастотної характеристики. Для цього спай термопари розігрівається струмом синусної форми. Завдяки розігріву підвідних провідників, збільшується їх температура, яка пропорційна потужності, що в них виділяється через наявність електричного опору, яка в

сою чергу пропорційна квадрату струму, який проходить через провідник. Таким чином ЕРС термопарі буде мати в своєму складі постійну складову і складову другої гармоніки (1).

$$E(t) = ki(t) = kI_m^2 \sin^2(\omega t) = k \frac{I_m^2}{2} (1 - \cos(2\omega t)). \quad (1)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) термопарі (2), в цьому випадку, буде визначається як відношення амплітуди змінної складової ЕРС термопарі у вигляді складової на подвійній частоті вхідного струму, до амплітуди другої гармоніки вхідного струму, отриманої шляхом піднесення миттєвих значень до квадрату, обчислювальним шляхом.

$$W(2\omega) = \frac{E_m(2\omega)}{I_m^2(2\omega)}. \quad (2)$$

Спрощена структурна модель процесів, які відбуваються в реальній термопарі при пропусканні через неї електричного струму представлена на рис. 1.

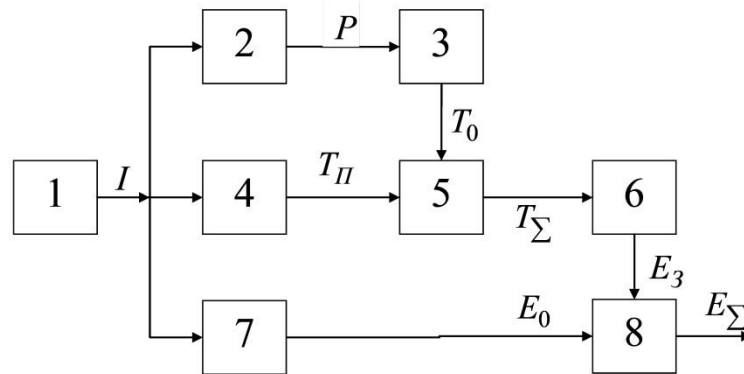


Рис. 1. Структурна модель процесів, які відбуваються в термопарі при пропусканні через неї електричного струму

де 1 – джерело струму; 2 – перетворювач струму в потужність; 3 – перетворювач потужності в температуру Джоуля; 4 – перетворювач струму в температуру Пельт’є; 5 – суматор температур; 6 – перетворювач температури в ЕРС Зеєбека; 7 – перетворювач струму в напругу на резисторах; 8 – суматор ЕРС Зеєбека і напруги на резисторах; I – струм через термопару; P – активна потужність, що виділяється на еквівалентному опорі провідників біля спаю термопарі.

Термопару можна представити як нероз’ємний чорний ящик. Еквівалентну електричну модель динамічної схеми термопарі можна представити у вигляді декількох послідовно включених аперіодичних ланок першого порядку, розв’язаних ідеальними повторювачами напруги (рис. 2). Кількість ланок та значення сталих часу не відомо.

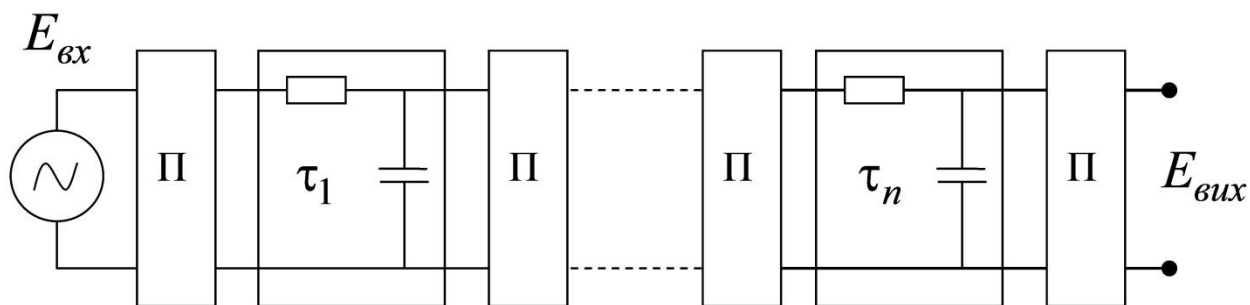


Рис. 2. Еквівалентна електрична модель динамічної схеми термопарі АФЧХ такої моделі (3), в комплексній формі є добуток комплексних коефіцієнтів передачі кожної ланки.

$$h(j\omega) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{1 + j\omega\tau_i}. \quad (3)$$

Модуль коефіцієнта передачі моделі на рис. 3 є добутком модулів окремих ланок (4).

$$h(\omega) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_i)^2}}, \quad (4)$$

де ω - частота, τ_i - стала часу. Фазовий зсув дорівнює сумі фазових зсувів окремих ланок (5).

$$\varphi_\Sigma = -\sum_{i=1}^n \arctg(\omega\tau_i). \quad (5)$$

У першому наближенні, для встановлення кількості сталих часу, запропоновано скористатись графіками АФЧХ термопарі. Фаза інерційної ланки із однією сталою часу не перевищує 90° і тому АФЧХ знаходиться у першому квадранті. Фаза інерційної лаки із двома сталими часу на перевищує 180° і тому АФЧХ розміщується у першому та другому квадранті і т.д. За графіком АФЧХ можна наближено встановити модель термопарі, яку в подальшому, можна використовувати для апроксимації експериментальних даних. Приклади графіків АФЧХ моделей термопарі із різною кількістю сталих часу зображено на рис 3.

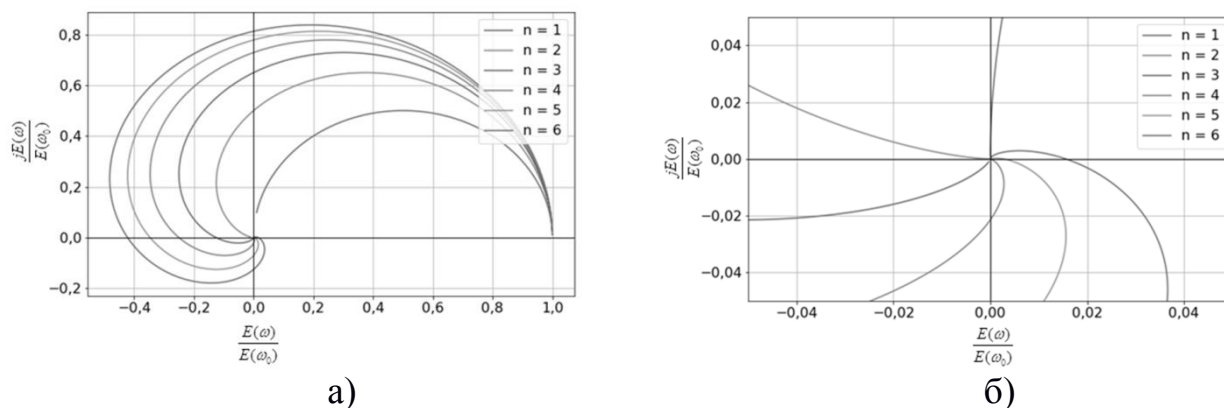


Рис. 3. Графіки АФЧХ моделей термопарі із різною кількістю сталих часу на частотах від 0 до ∞ .

а) загальний масштаб; б) збільшений масштаб; n – кількість сталих часу

У роботі отримано відносні похибки математичних моделей перехідної та амплітудо-фазочастотної характеристик для двох сталих часу.

Як зазначалось, загальна модель перехідної характеристики термопари описується рівнянням (6).

$$E(t) = E_0 \left(1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right). \quad (6)$$

Виконавши перетворення рівняння (6) для виділення похибок параметрів отримали загальний вираз (7).

$$A = 1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \quad (7)$$

де $A = \frac{E(t)}{E_0}$. Використавши алгебраїчний метод визначення відносної похибки

функції на основі відносних похибок аргументів, шляхом розкладу складного виразу на елементарні функції відносні похибки яких відомі, було розраховано відносну похибку значень перехідної характеристики у залежності від відносних похибок вимірювання часу та визначення сталих часу (8).

$$\delta(A) = \frac{1}{1 + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \left[\left(k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \frac{t}{\tau_1} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{t}{\tau_2} \right) \delta(t) + k_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\delta(k_1) - \frac{t}{\tau_1} \delta(\tau_1) \right] + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \left[\delta(k_2) - \frac{t}{\tau_2} \delta(\tau_2) \right] \right]. \quad (8)$$

Розширена модель перехідної характеристики термопари (табл. 1) дозволяє скоротити кількість невідомих, тим самим зменшивши кількість джерел впливу на загальну похибку. Для цього потрібно розкрити коефіцієнти при експонентах k_1 та k_2 .

Замінивши значення параметрів у рівнянні (табл. 1) на вирази для сталих часу та скориставшись алгебраїчним методом було розраховано відносну похибку значень розширеної моделі перехідної характеристики у залежності від відносних похибок вимірювання часу та визначення сталих часу (9).

$$\delta(A) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}} * \left[\left(\frac{t}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{t}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \delta(t) + \frac{t(\tau_1 - \tau_2) - 2\tau_1^2}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} \delta(\tau_1) - \frac{2\tau_2^2 + t(\tau_1 - \tau_2)}{(\tau_1 - \tau_2)^2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \delta(\tau_2) \right]. \quad (9)$$

Замінивши коефіцієнти впливу при похибках отримали результуючий вираз рівняння похибки (10).

$$\delta(A) = B[C\delta(t) + D\delta(\tau_1) - E\delta(\tau_2)]. \quad (10)$$

Що стосується ідентифікації динамічних характеристик термодпар, потрібно знати вплив похибок вимірювання часу та термо-ЕРС термодпари на похибки визначення сталих часу. Скориставшись рівнянням (10), та знехтувавши похибкою вимірювання часу та взявши дві точки на перехідній характеристиці отримано залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань термо-ЕРС термодпари (11).

$$\begin{cases} \delta(\tau_1) = \frac{E_2(D_1B_1 - D_2B)_2}{D_2B_1B_2(D_2E_1 - D_1E_2)}\delta(A_1) + \frac{1}{D_2B_2}\delta(A_2) \\ \delta(\tau_2) = \frac{D_1B_1 - D_2B_2}{B_1B_2(D_2E_1 - D_1E_2)}\delta(A_1) \end{cases} \quad (11)$$

Також були отримані рівняння похибок моделі АЧХ термодпари (4) шляхом застосування алгебраїчного методу (12).

$$\delta(K) = -\frac{\omega^2[\tau_1^2 + 2\omega^2(\tau_1\tau_2)^2 + \tau_2^2]}{1 + (\omega\tau_1)^2}\delta(\omega) - \frac{(\omega\tau_1)^2}{1 + (\omega\tau_1)^2}\delta(\tau_1) - \frac{(\omega\tau_2)^2}{1 + (\omega\tau_2)^2}\delta(\tau_2). \quad (12)$$

Замінивши коефіцієнти впливу при похибках отримали результуючий вираз рівняння похибки (13).

$$\delta(K) = B\delta(\omega) + C\delta(\tau_1) + D\delta(\tau_2). \quad (13)$$

Знехтувавши похибкою вимірювання частоти та взявши дві точки на АЧХ отримано залежність похибок визначення сталих часу від похибок вимірювань АЧХ термодпари (14).

$$\begin{cases} \delta(\tau_1) = \frac{1}{C_1 - D_1} \left[\frac{C_1 + C_2 - D_1}{C_1} \delta(K_1) - \delta(K_2) \right] \\ \delta(\tau_2) = \frac{C_1}{D_1(C_1 - D_1)} \left[\delta(K_2) - \frac{C_2}{C_1} \delta(K_1) \right] \end{cases} \quad (14)$$

За результатами проведених досліджень динамічних характеристик лінійних систем, у роботі запропоновано проводити ідентифікацію динамічних характеристик термодпар за перехідною та амплітудно-частотною характеристиками.

У третьому розділі розглянуто методи ідентифікації динамічних характеристик термодпар.

Запропоновано метод ідентифікації динамічної характеристики термодпари, заснований на внутрішньому розігріві спаю термодпари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка (рис 4). Використання радіоімпульсу струму дозволяє позбутись ефекту Пельт'є, який виникає на спаю термодпари у залежності від напрямку протікання струму і дозволяє реєструвати перехідний процес термодпари. Радіоімпульс пропускають через термодпару періодично з постійним збільшенням тривалості і амплітуди радіоімпульсу. Після досягнення термодпарою стану рівноваги, визначають динамічну характеристику термодпари з отриманих діаграм залежності термоЕРС від часу.

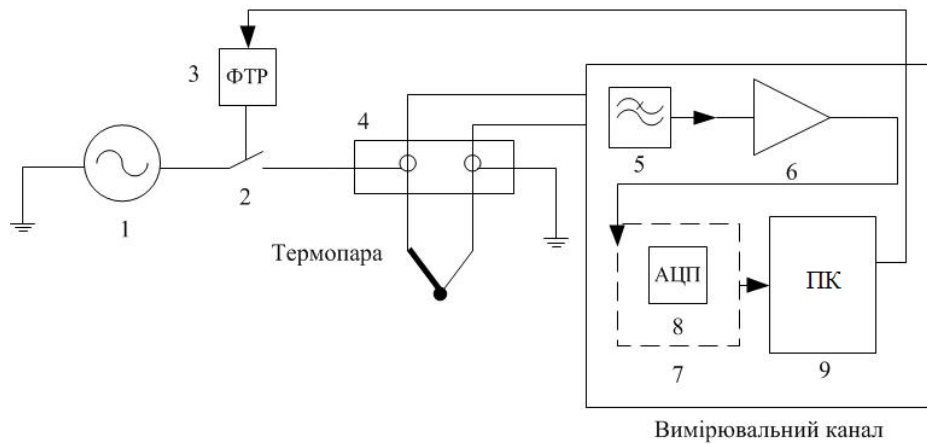


Рис. 4. Структурна схема визначення динамічних характеристик термопар із використанням радіоімпульсу струму. 1. Генератор радіоімпульсу струму; 2. перемикач; 3. формувач тривалості радіоімпульсу (ФТР); 4. вхідний пристрій для кріплення вільних кінців досліджуваної термопари; 5 аналоговий фільтр нижніх частот, 6. підсилювач сигналу термо-ЕРС; 7. вимірювальний модуль; 8. аналого-цифровий перетворювач (АЦП), 9. ПК.

Результати отримані при дослідженні термопари типу С (рис. 5) дозволили підтвердити можливість застосування даного способу визначення динамічних характеристик термопар.

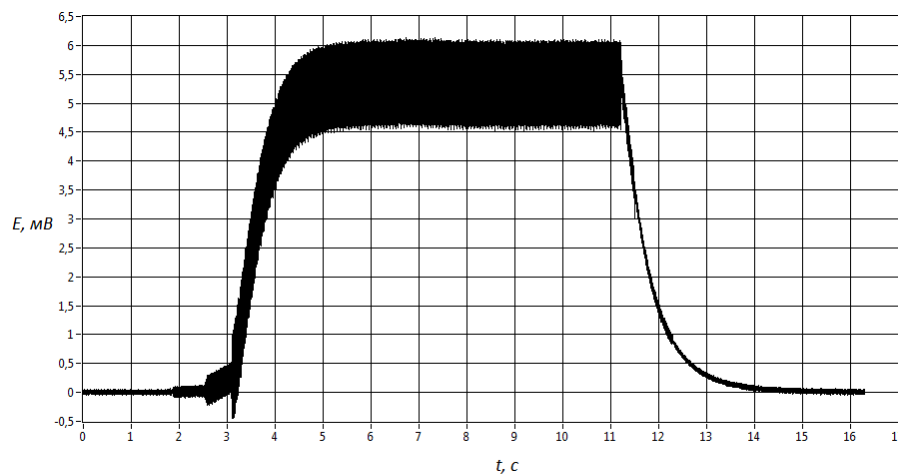


Рис. 5. Експериментальні дані, отримані при дослідженні термопари типу С.

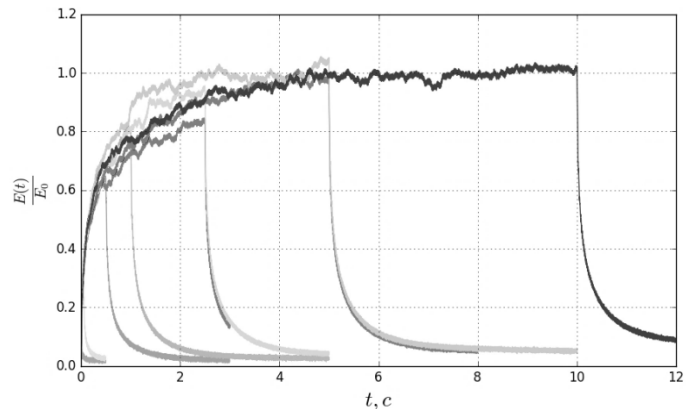
У роботі розроблено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури, для реалізації запропонованого підходу ідентифікації динамічних характеристик термопар на основі перехідної характеристики. Для підтвердження теоретичних розрахунків був створений експериментальний стенд (рис. 6, а).

Для досліджень була використана термопара типу С (вольфрам/рений-5, вольфрам/рений-26), з діапазоном температури від 0 до 2500 °С. Були проведені експериментальні дослідження для визначення динамічних характеристик термопар. Експерименти полягали в створенні температурного стрибка на спаю і реєстрації перехідної характеристики (термо-ЕРС). В результаті цих

експериментів були отримані сімейства перехідних характеристик (рис. 6, б), при різній тривалості імпульсу та постійній потужності.



а)



б)

Рис. 6. Експериментальний стенд для визначення динамічних характеристик термопар із використанням лазера а) та сімейство перехідних характеристик термопар типу С, отримані при постійному значенні потужності лазера і різному часі впливу б)

У роботі запропоновано метод експериментального дослідження динамічних характеристик термопар на основі АФЧХ, суть якого пописана у другому розділі.

Оскільки значення ЕРС термопар E_3 лежить в мілівольтовому діапазоні, а ЕРС E_0 у вольтовому діапазоні, то при знаходженні E_3 , представлену другою гармонікою в сумарній ЕРС E_Σ необхідно подавити набагато більшу E_0 , яка представлена першою гармонікою. Оскільки фазових зсувів зазнають ЕРС, як на другій так і на першій гармоніці, то ефективне подавлення повинне бути векторне, тобто з регулюванням, як амплітуди, так і фази. Подавлення ЕРС першої гармоніки може бути, як за допомогою селективного фільтру так і компенсаційним способом. Структурна схема пристрою для отримання АФЧХ з компенсацією першої гармоніки представлена на рис. 7.

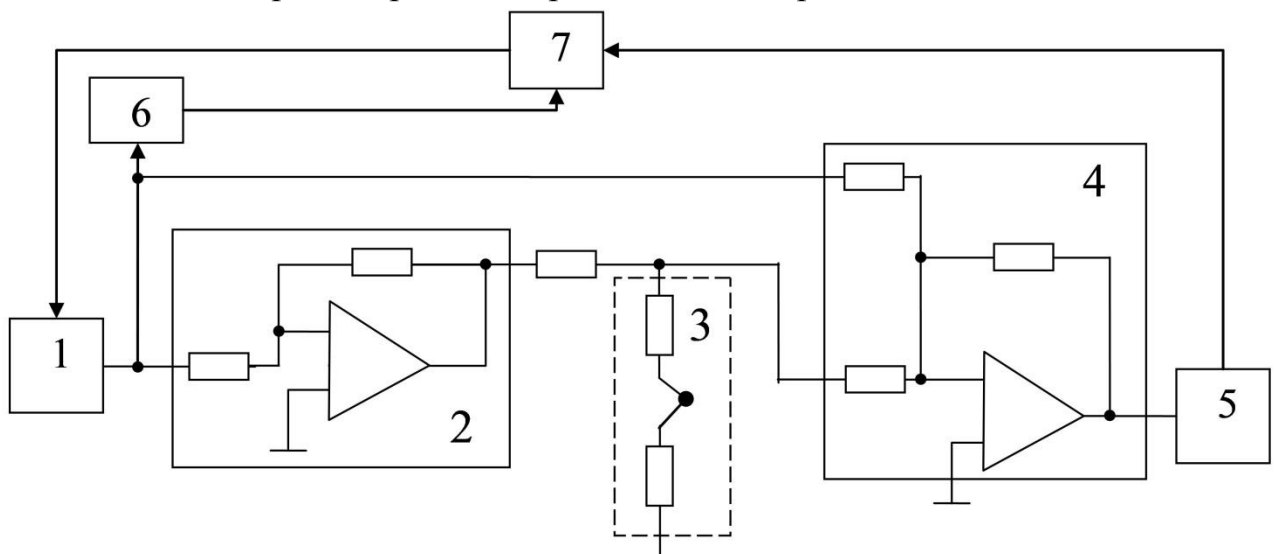


Рис. 7. Структурна схема пристрою для вимірювання АЧХ термопар де: 1 – ЦАП синтезатор синусного струму; 2 – інвертор; 3 – термопара; 4 – суматор; 5 – АЦП; 6 – квадратор; 7 – комп'ютер.

Можливо також часткове подавлення першої гармоніки шляхом компенсації її напругою близькою до протифазної, для досягнення більшого відношення складових другої та першої гармонік із метою покращення подальшого спектрального аналізу.

Схема (рис. 7) була реалізована у системі для вимірювання АФЧХ термопари та визначення значень сталих часу. Частиною даної системи є універсальне шасі NI PXI компанії National Instruments із набором модулів для збору та генерації сигналів.

На основі проведених досліджень був побудований годограф АФЧХ термопар (рис. 8, а). Проаналізувавши отриманий годограф, встановлено, що термопари містять не менше двох сталих часу, оскільки затримка фаз більша 90° . Встановивши порядок моделі термопари, можна перейти до апроксимації АЧХ термопари. Для цього, взявши модуль від АФЧХ була отримана АЧХ термопари, а взявши арктангенс АФЧХ отримали ФЧХ термопари (рис. 8, б).

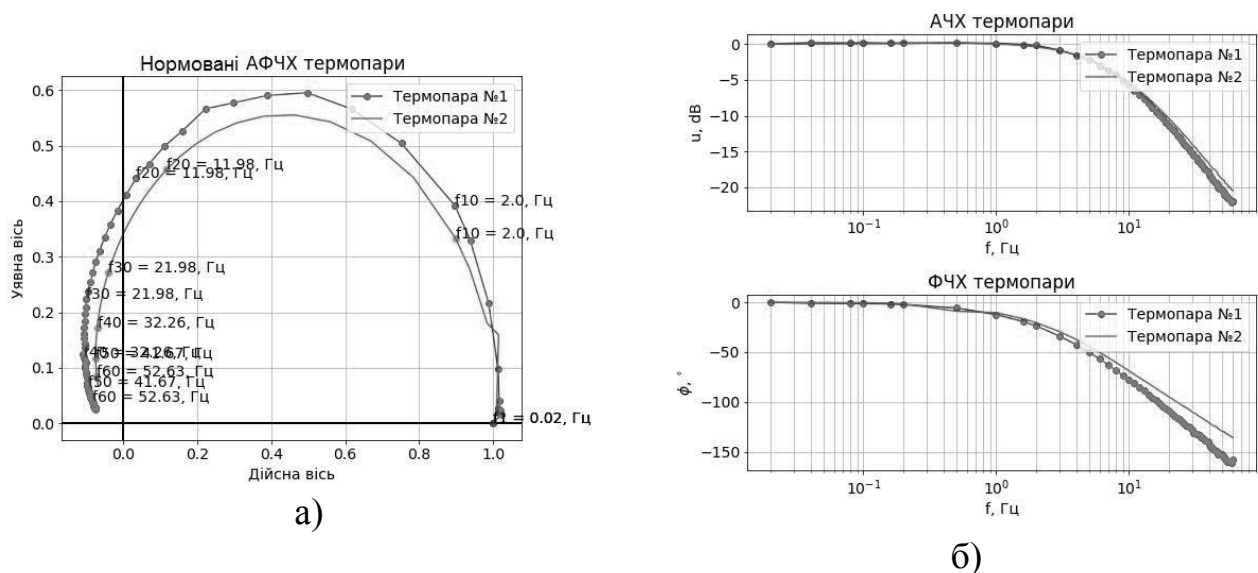


Рис. 8. Експериментально отримані значення АФЧХ двох термопар

Запропоновані методи дозволяють більш точно визначати динамічні характеристики термопар, що в свою чергу дозволяє підвищити точність вимірювання нестационарних температур та розширити сферу застосування термопар.

У четвертому розділі виконано експериментальні та теоретичні дослідження розроблених методів.

Аналіз перехідних характеристик термопар типу С дозволив отримати модель перехідної характеристики, при тривалості вхідного сигналу 10 с у часовій формі:

$$A = 1 - 0,418 \cdot e^{\frac{-t}{1,630}} - 0,393 \cdot e^{\frac{-t}{0,136}} - 0,283 \cdot e^{\frac{-t}{0,012}} + 0,094 \cdot e^{\frac{-t}{0,004}},$$

Та отримати передавальну функцію термопари у операторній формі:

$$W(p) = \frac{1}{(1,630p + 1)(0,136p + 1)(0,012p + 1)(0,004p + 1)}.$$

Наступним, був досліджений метод визначення сталих часу термопари шляхом апроксимації рівняння АЧХ термопар методом найменших квадратів. Відносна похибка апроксимації розраховувалась за формулою:

$$\gamma_a = 100\% \cdot \left[\frac{u_a(f)}{u_e(f)} - 1 \right],$$

де $u_a(f)$ - апроксимована АЧХ термопари; $u_e(f)$ - експериментальна АЧХ термопари. У табл. 2 наведено результуючі значення постійних часу для моделей з однією, двома та трьома сталими часу за даними експерименту.

Таблиця 2. Узагальнена таблиця розрахованих сталих часу термопари

Кількість сталих часу	τ_1 , с	τ_2 , с	τ_3 , с
1-а стала часу	0,02458		
2-і сталі часу	0,02279	0,00158	
3-и сталих часу	0.02279	0.00158	1,11574e-10

Не врахування другої сталої часу призводить до похибки визначення першої сталої часу 8 %.

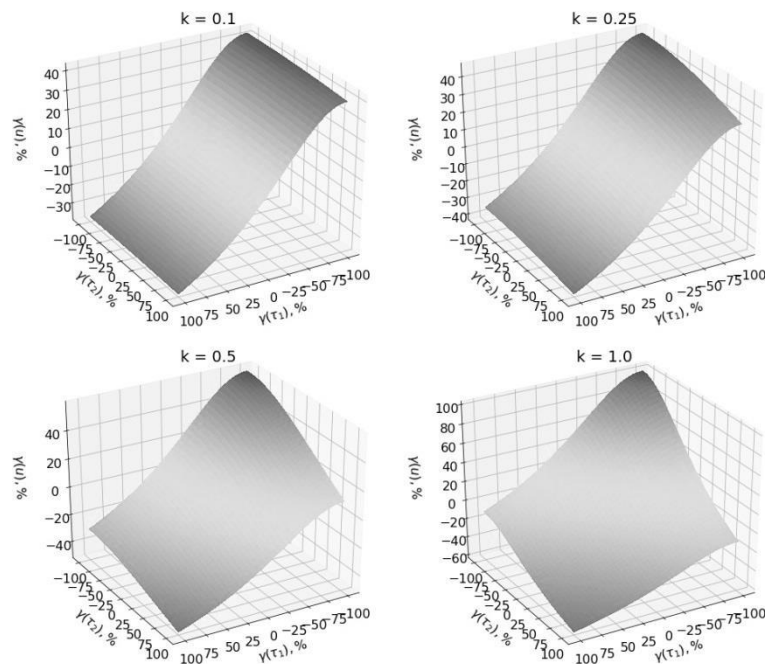


Рис. 9. Графіки залежності похибок моделі АЧХ від похибок $\gamma(\tau_1)$ та відношення постійних часу k для частоти $\omega = 40$ рад/с

Були проведені дослідження залежності похибок моделі АЧХ від похибок задання постійної часу $\gamma(\tau_1)$ відносно знайденого значення (табл. 2) та відношення постійних часу k , яке визначалось виразом:

$$k = \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

Оскільки для інфранизьких частот динамічна характеристика майже не впливає на результат вимірювання, то дослідження проводились для частот

вище частоти зрізу визначеної моделі термопари (табл. 2). Результати таких досліджень для частоти $\omega = 40$ рад/с приведені на рис. 9. Вплив другої постійної часу для $k = 0,1$ на похибку вимірювання незначний, що обумовлено малістю значення. Із збільшенням відношення k вплив другої постійної часу на похибку вимірювання зростає.

З метою оцінки невизначеності двох розрахованих постійних часу, було проведено декілька експериментів із отримання АЧХ термопари. Вибірка становила 20 отриманих АЧХ, на основі яких були вираховані двадцять вибірок постійних часу. В табл. 3 наведені статистичні оцінки вибірки.

Таблиця 3. Статистичні значення вибірки

	τ_1	τ_2
$\bar{\tau}$, с	0.022785	0.001577
S , с	0.000045	0.000042
S , %	0.197665	2.664298

Невизначеність отриманих значень постійних часу становить $u_A(\tau_1) = 0,000009$ с та $u_A(\tau_2) = 0,000010$ с.

Також можна зробити висновок, що навіть незначні відхилення у значеннях сталих часу або при неврахування кількості останніх, призводить до значних похибок у значення ЕРС термопари за умови використання її у перехідному процесі для вимірювання коротких теплових імпульсів.

На рис. 10 зображено результат відновлення сигналу температурного імпульсу, приведеного до максимального значення. Після використання фільтру і проведення деконволюції відновлений сигнал містить шум. Для збільшення відношення сигнал-шум застосовано фільтр Савіцького-Голея до відновленого сигналу. В результаті, приведена похибка відновлення імпульсу температури склала 5 %.

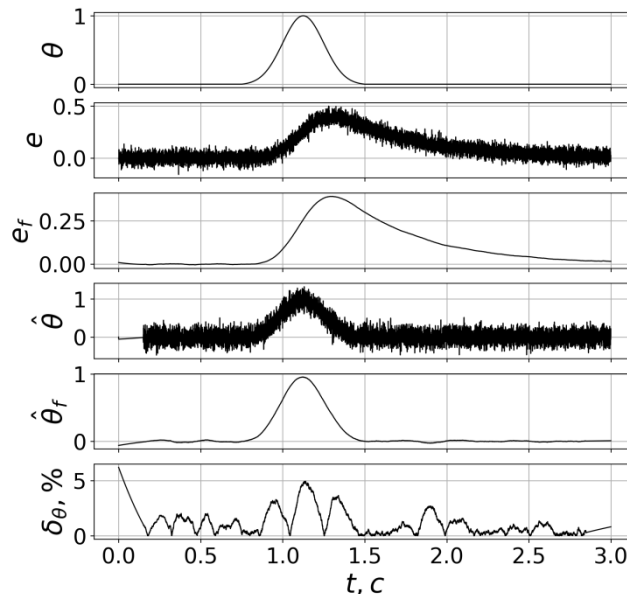
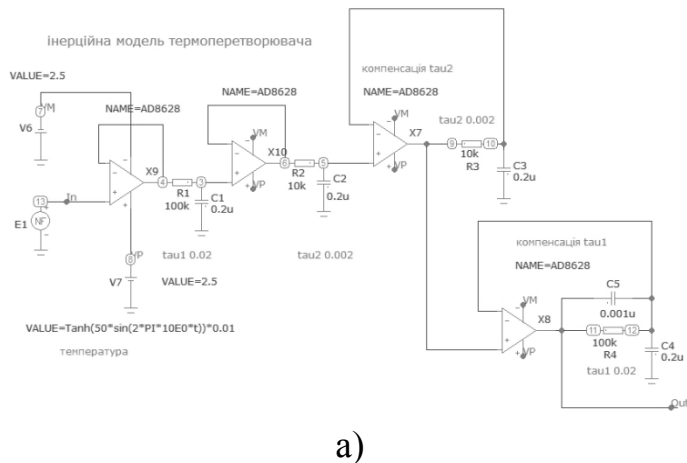
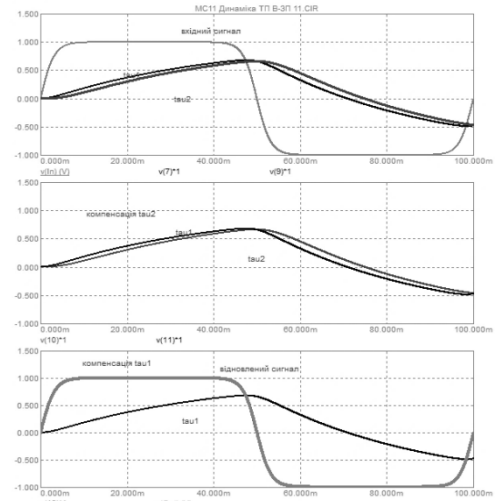


Рис. 10. Відновлення імпульсу температури за наявності незначного шуму в сигналі термо-ЕРС р а) та із використанням фільтру Савіцького-Голея

Для реалізації представленого методу відновлення температурного імпульсу, розроблено портативний пристрій вимірювання температури коротких теплових імпульсів, який компенсує динамічну похибку вимірювання температури у реальному часі та дозволяє апаратним шляхом виконати відновлення вхідного сигналу шляхом включення у зворотню ланку динамічної характеристики термопари (рис. 11, а). На рис. 11, б) наведено графіки відновлення моделлю портативного вимірювача вхідного температурного імпульсу.



а)



б)

Рис. 11. Електрична модель портативного вимірювача температури коротких теплових імпульсів а), та графіки відновлення моделлю портативного вимірювача вхідного температурного імпульсу б)

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримали подальший розвиток методи вимірювання нестационарної температури контактними засобами, за рахунок розвитку методів ідентифікації динамічних характеристик термопар, теоретичного та практичного дослідження нових підходів до ідентифікації динамічних характеристик, які засновані на внутрішньому розігріві термопари гармонічним струмом, але із використанням розроблених методів отримання динамічних характеристик, використання розробленого підходу до відновлення сигналу температури за вимірними значеннями термо-ЕРС, які дозволяють підвищити точність вимірювання температури коротких теплових імпульсів, що є важливим при вимірюванні температури вибухів, при дослідженні систем від'єднання літальних апаратів, зарядів піропатронів, вимірюванні температури газових потоків на виході камер згорання. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному.

1. Удосконалено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури, що дозволяє отримати режим установа сигналу термо-ЕРС на виході термопари.

2. Розроблено та впроваджено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар шляхом внутрішнього розігріву спаю термопари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка, що дозволяє отримати повну перехідну характеристику.

3. Розроблено та впроваджено метод ідентифікації динамічних характеристик термопар, заснований на визначенні сталих часу термопар шляхом аналізу амплітудно-фазової частотних характеристик термопар по другій гармоніці, яку отримують внутрішнім розігрівом спаю термопари гармонічним струмом. За даними експериментальних досліджень, даний метод дозволяє отримати відносну стандартну невизначеність найбільшої сталої часу, що не перевищує 0,3%. Використання неповної моделі динамічної характеристики та неврахування інших сталих часу призводить до похибки визначення однієї сталої часу у 8%.

4. Розроблено метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів, який відрізняється можливістю відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за вимірними значеннями термо-ЕРС термопари, за рахунок включення у зворотній зв'язок операційного підсилювача апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари. На відміну від існуючих методів, відносна стандартна невизначеність вимірювання температури короткого теплового імпульсу становить 5%.

5. Для збільшення швидкодії термопари, окрім зменшення маси спаю, доцільно використовувати перехідний режим роботи термопари, із якого, при знанні її динамічних характеристик, можливо установити температуру теплового імпульсу як функцію часу. Доцільно, до документації термопар, окрім статичних додавати їх динамічні характеристики. За даними експериментальних досліджень, динамічна характеристика у вигляді АФЧХ знаходиться із достатньо високою точністю.

6. Результати роботи впроваджені при розробці та виготовленні вимірювальної системи відокремлюваного елемента.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Автоматизація аналізу вимірювальних пристроїв: монографія / Туз Ю.М., Шумков Ю.С., Козир О.В. Київ, 2014. 172 с.

Фахові видання України категорії «А», Scopus:

2. Tesyk Yu.F. Investigation of characteristics of precision amplifiers / Yu.F. Tesyk, R.M. Moroz, Yu.M. Tuz, O.V. Kozyr // Technical Electrodynamics. Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine. - No 6, 2020. P. 87 – 93. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.087>.

Статті у фахових виданнях:

3. Туз Ю.М. Безконтактные методы измерения температуры пламени / Ю.М. Туз, С.А. Шурпач, О.В. Козырь // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1, II (45). С. 228—233.

4. Радченко С. Г. Применение равномерно распределенных последовательностей для решения прикладных задач моделирования / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 1. – С. 151-158.

5. Радченко С. Г. Планы экспериментов для получения моделей высокой точности / С. Г. Радченко, О. В. Козир // Математичні машини і системи. – 2014. - № 2. – С. 117-127.

6. Туз Ю. М. Спосіб визначення динамічних характеристик термодатчиків за допомогою радіоімпульсу струму / Ю. М. Туз, О. В. Козир, А. В. Порхун. // Системи обробки інформації. – 2016. – №6. – С. 164–166.

7. Козир О.В. Вимірювання нестаціонарної температури контактним методом / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. - 2017. - № 17. С. 134-143. DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-3804172017100686> <http://ismc.kpi.ua/article/view/100686>.

8. Козир О.В. Відновлення форми температурного імпульсу за допомогою метод деконволюції/ О.В. Козир // Механіка гіроскопічних систем. - 2017. - № 34. С. 89-97. DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771342017130269> <http://mgsys.kpi.ua/article/view/130269>.

9. Козир О.В. Математичне моделювання перехідних характеристик термодатчиків / О.В. Козир // Інформаційні системи, механіка та керування. – 2018. - № 19. С. 101-114. <https://doi.org/10.20535/2219-3804192018162296> <http://ismc.kpi.ua/article/view/162296>.

10. Козир О.В. Дослідження моделей перехідної характеристики термодатчиків / О. В. Козир, Ю. М. Туз // Механіка гіроскопічних систем. – 2019. № 37. С. 25-37 <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771372019711361>.

Патенти:

11. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 109832 Україна. № 201602293; заявл. 10.03.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 4 с.

12. Пристрій для визначення динамічних характеристик термодатчиків: пат. 110516 України. № 201604176; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

13. Спосіб визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 110515 України. № 201604174; заявл. 15.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 4 с.

14. Пристрій для визначення динамічних характеристик термоперетворювачів: пат. 112499 України. № 201604190; заявл. 18.04.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

Тези:

15. Туз Ю. М. Особливості вимірювання температури коротких теплових імпульсів / Ю. М. Туз, О. В. Козир // XII Міжнародна науково-технічна конференція «МЕТРОЛОГІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА (МЕТРОЛОГІЯ – 2020) (СЕКЦІЯ 7. ТЕРМОМЕТРІЯ), 6–8 жовтня 2020 р. Харків. : тези доп. / Національний науковий центр «Інститут метрології». – Харків, 2020. – С. 106

АНОТАЦІЯ

Козир О.В. Підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота містить результати дослідження, які спрямовані на підвищення точності вимірювання температури коротких теплових імпульсів.

Проаналізувавши існуючі методи вимірювання температури було запропоновано використовувати для вимірювання температури коротких теплових імпульсів термопару у перехідному режимі її роботи, а дійсні значення температурного сигналу відновлювати шляхом вирішення оберненої задачі вимірювання.

У роботі набув подальшого розвитку метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на зовнішньому розігріві спаю термопари лазерним променем шляхом створення квазіступінчатого сигналу температури.

Розроблено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на внутрішньому розігріві спаю термопари струмом гармонічної форми із періодом, що на декілька порядків менший від найменшої передбачуваної сталої часу, що забезпечує дію на спай температурного сигналу у формі стрибка.

Розроблено метод ідентифікації динамічної характеристики термопари, заснований на визначенні сталої часу термопари шляхом аналізу амплітудно-фазової частотної характеристики термопари по другій гармоніці, яку отримують внутрішнім розігрівом спаю термопари гармонічним струмом.

Розроблено метод вимірювання поточної температури коротких теплових імпульсів, який відрізняється можливістю відновлювання форми температури короткого теплового імпульсу за виміряними значеннями термо-ЕРС термопари, за рахунок включення у зворотній зв'язок операційного підсилювача апаратурно-реалізованої динамічної характеристики термопари.

Ключові слова: температура, тепловий імпульс, вимірювання, перехідна характеристика, АФЧХ, підвищення точності, ідентифікація динамічних характеристик, термопара.

ABSTRACT

Kozyr O.V. Improving the accuracy of temperature measurements of short heat pulses. – Manuscript copyright.

The thesis contains the results of research aimed at improving the accuracy of measuring the temperature of short heat pulses.

The analysis of current state of development of methods and tools for measuring temperature, which are based on the use of the dependence of various physical phenomena on temperature, as direct temperature measurement is not possible, is carried out in the work.

In the dissertation work in the scientific plan the following results are received:

1. For the first time, a method of thermocouple identification by a radio pulse of current, which allowed to obtain a complete transient characteristic in contrast to

other methods that use current for heating, which receive a decreasing front and then mathematically converted to an increasing front, is proposed. This method uses a radio current pulse to heat the thermocouple. By spreading the frequency of the heating signal and the reaction of the thermocouple, it became possible to isolate the slowly increasing signal of the thermocouple against the background of a high frequency signal that heats the thermocouple using analog filtering of the high frequency component by a notch filter;

2. For the first time was developed a method of thermocouple identification by determining the frequency response of a thermocouple using infra-low frequency current, which has an advantage over other methods due to the stability of obtaining time constant values. The peculiarity of this method is to create the total temperature by heating the junction of the thermocouple with an electric sinusoidal current. In this case, the voltage of the second harmonic is released on the terminals of the thermocouple, due to the heating of the thermocouple according to the Joule effect. Also, there is the first harmonic component, which is due to the voltage drop due to the ohmic resistance of the thermocouple wires and the action of the Thomson and Peltier effects, which are proportional to the first degree of the current flowing through the thermocouple. The ratio of the amplitudes of the output and input voltages on the second harmonic gives the frequency response. The difference of their phases on the second harmonic gives Phase response.

3. Improved methods for identifying the dynamic characteristics of the laser beam by creating a quasi-stage signal, which allows to obtain the mode of setting the thermoEMF signal at the output of the thermocouple.

4. The method of measuring the temperature of short thermal pulses is improved, which allows to compensate the dynamic measurement error in real time, by using the parameters obtained on the basis of identification of dynamic characteristics of the thermocouple in the system of thermal inertia compensation of the thermocouple. The peculiarity of this method is the use of time constants of the thermocouple to compensate its thermal inertia and, as a consequence, increase the accuracy of measuring the temperature of short thermal pulses. The time constants of the thermocouple will be obtained on the basis of the approximation of the frequency response of the thermocouple. The frequency response is obtained using the above method of identifying the dynamic characteristics of thermocouples. Each defined time constant characterizes the link of the delay of the first order. By including the inertia link in the feedback system of the system, the thermal inertia of the thermocouple, which is described by a certain time constant, is compensated. By connecting the links in series with the inertial link connected to the feedback, which corresponds to the time constant found, it is possible to fully compensate for the effect of thermal inertia of the thermocouple on the input temperature signal. This compensates dynamic error of thermocouple temperature measurement.

Keywords: temperature, thermal impulse, measurement, transient characteristic, bode plot, increase of accuracy, identification of dynamic characteristics, thermocouple.